

33-0084

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

Magnetostriktiver Effekt zur zerstörungsfreien
Überprüfung von Spanngliedern auf Spannstahlbrüche
und Verpressung

von

K. Landwehrs

J. Neisecke

F.S. Rostásy

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Braunschweig, 1983

Die vorliegende Forschungsarbeit wurde mit Hilfe von
Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen (Erlaß Nr. 14/78
vom 12.07.1978 des MWK) gefördert.

V o r w o r t

Seit über einem Jahrzehnt werden am Instiut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig Forschungsvorhaben mit dem Ziel einer Verbesserung der zerstörungsfreien Prüfverfahren für Betonbauwerke durchgeführt. Die dabei eingesetzten Prüfgrößen sind die Ausbreitungsgeschwindigkeit, die Intensität sowie die Echos von kurzen Ultraschall-Impulsen. Derartige Untersuchungen waren und sind noch immer dringend erforderlich, da die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung im Bauwesen - speziell am Werkstoff Stahl- und Spannbeton - nach wie vor mit großen meßtechnischen Schwierigkeiten verbunden ist.

Der von der Praxis immer wieder geäußerte Wunsch, gebrochene und beschädigte Spanndrähte oder unverpreßte Hüllrohre "von außen" auf zerstörungsfreiem Wege zu erkennen, war für die Autoren Veranlassung, das hier vorgelegte Forschungsvorhaben zur Überprüfung des sog. "magnetostriktiven Effektes" auf seine Brauchbarkeit für eine zerstörungsfreie Kontrolle von Spanngliedern dem niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kunst zur Förderung vorzuschlagen.

Nach Abschluß aller Arbeiten danken die Autoren mit Vorlage dieses Schlußberichtes gleichzeitig der fördernden Institution für die Bereitstellung der erforderlichen Forschungsmittel aus den Beiträgen des Zahlenlottos.

Braunschweig, im August 1983

(F.S. Rostásy)

(J. Neisecke)

(K. Landwehrs)

I n h a l t

1. Einführung
2. Problemstellung
3. Grundlagen
 - 3.1. Allgemeines zur Ultraschallprüfung
 - 3.2. Schallausbreitung in Stäben
 - 3.2.1. Stäbe mit freien Oberflächen
 - 3.2.2. Ummantelte Stäbe
 - 3.3. Ultraschallerzeugung durch Magnetostriktion
 - 3.4. Erzeugung des Prüfsignals
4. Meßapparatur
 - 4.1. Ultraschallgerät "Ferrotron"
 - 4.1.1. Sender Type S2
 - 4.1.2. Empfänger Type A
 - 4.2. Wandler­spulen
 - 4.2.1. Sendespulen
 - 4.2.2. Empfangsspulen
 - 4.3. Gleichfeldmagnetisierung
 - 4.4. Spulenanordnung
 - 4.4.1. Direkte Durchschallung
 - 4.4.2. Echotechnik
5. Messungen
 - 5.1. Dämpfung
 - 5.2. Schallgeschwindigkeit
 - 5.3. Wellenlänge
6. Ergebnisse
 - 6.1. Freiliegende Spannstähle und Litzen
 - 6.1.1. Freiliegende Spannstähle ohne Fehler
 - 6.1.2. Freiliegende Spannstähle mit künstlichen Fehlern
 - 6.1.3. Freiliegende Spannlitzen ohne Fehler
 - 6.1.4. Freiliegende Spannlitzen mit künstlichen Fehlern
 - 6.2. Verpreßte Spannstähle
7. Ausblick
 - 7.1. Spannglieder mit Verbund
 - 7.2. Spannglieder ohne Verbund
8. Zusammenfassung
9. Literatur

1. Einführung

Nachdem die Spannbetonbauweise ursprünglich hauptsächlich bei Brückenkonstruktionen Verwendung fand, wurde sie in den letzten Jahrzehnten auch bei Behälterbauwerken, Dachkonstruktionen, Fahrbahnplatten, Hängebalken, Masten u.v.a. mit großem Erfolg eingesetzt. Durch die Kombination der hohen Zugfestigkeit des Spannstahls mit der Druckfestigkeit und der korrosionshemmenden Wirkung des Betons ergeben sich vielfältige, vor allem auch wirtschaftliche Vorteile gegenüber Stahlbeton- oder Stahlkonstruktionen, so daß sich die Aufzählung sinnvoller Einsatzbereiche nahezu beliebig fortsetzen ließe [1].

Andererseits treten in Spannbetonbauteilen infolge der hohen Vorspannung schon im belastungsfreien Fall Spannungen auf, die höher liegen als in einem mit der zulässigen Höchstlast beaufschlagten Stahlbetonbauwerk. Für die Standsicherheit eines Spannbetonbauwerkes ist daher die genaue Einhaltung der konstruktionsseitig geforderten Materialspannungen und -festigkeiten unbedingt erforderlich; ein wesentlicher Gefahrenpunkt liegt dabei in einem teilweisen oder vollständigen Nachlassen der Vorspannung, beispielsweise durch den Bruch einzelner Spannstähle. Fehlende Vorspannung ist, da die Spannglieder nach dem Verpressen der Hüllrohre nicht mehr zugänglich sind, von außen normalerweise erst durch die Folgeschäden am Bauteil, wie etwa Rißbildung, zu erkennen.

Als eine der häufigsten Ursachen für Spannstahlbrüche gilt neben Material- und Ausführungsfehlern die Korrosion infolge mangelhafter Verpressung der Hüllrohre. Zum einen fehlt an den nicht mit Verpreßmörtel ausgefüllten Stellen dessen durch seine Alkalität bedingte korrosionsschützende Wirkung, zum anderen kann sich in den Hohlräumen Feuchtigkeit ansammeln, so daß hier sehr günstige Voraussetzungen für Korrosionsvorgänge gegeben sind.

Bislang existieren keine zuverlässigen und wirtschaftlichen Prüfverfahren, mit denen zerstörungsfreie Untersuchungen fertiggestellter Spannbetonbauwerke auf Spanngliedbrüche und Verpreßzustand möglich wären. Am Institut für Baustoffe, Massivbau und

Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig wurde deshalb ein Forschungsvorhaben mit dem Ziel durchgeführt, festzustellen, inwieweit durch magnetostriktive Ultraschallmessungen am Spannstahl Aussagen über Brüche und mangelhafte Verpressung gemacht werden können. Hierbei konnte auf langjährige Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Ultraschalluntersuchung von Beton sowie Erfahrung bei der Ultraschallprüfung von Spanngliedern zurückgegriffen werden [2].

2. Problemstellung

Für die Erzeugung von Ultraschall (US) zur Materialprüfung an metallischen Objekten haben sich Schallwandler aus piezoelektrischen Sinterkeramikstoffen wie Bariumtitanat oder Blei-Zirkonat-Titanat weitgehend durchgesetzt [3]. Diese Wandler werden über eine plastische Zwischenschicht (z.B. Öl, Fett, Wasser, Kleber) an den Prüfkörper angekoppelt, wobei Verluste infolge der unterschiedlichen akustischen Eigenschaften unvermeidlich sind und in ihrem Ausmaß stark von der Beschaffenheit der zu koppelnden Oberflächen abhängen. Einwandfreie, d.h. verlustarme und reproduzierbare Ankopplung von Standardprüfköpfen ist in der Regel nur an völlig glatten, ebenen Flächen möglich. Diese Voraussetzungen sind i.A. bei Spannstählen unter den Praxisbedingungen des Bauwesens nicht gegeben und können oft auch nachträglich nicht oder nur mit großem Aufwand hergestellt werden; zuverlässige Intensitäts- und damit Dämpfungsmessungen sind jedoch unter solchen Bedingungen nicht möglich.

Eine vor der Entwicklung leistungsfähiger piezoelektrischer Materialien häufig benutzte Methode der Schall- und Ultraschallerzeugung bestand in der Ausnutzung des magnetostriktiven Effektes ferromagnetischer Stoffe (siehe 3.3.). Damit lassen sich ebenfalls separate, mechanisch anzukoppelnde Schallwandler konstruieren, die naturgemäß den o.g. Einschränkungen unterliegen und außerdem einen gegenüber Piezowandlern geringeren Wirkungsgrad aufweisen. Zusätzlich kann bei magnetisierbaren Materialien - wie z.B. Stahl - der Ultraschall jedoch direkt im Werkstück erzeugt werden, wobei die Kopplung dann über ein Magnetfeld, also ohne mechanischen Kontakt erfolgt, so daß die Oberflächenbeschaffenheit des Prüflings vorteilhafterweise keine Rolle spielt.

Während mit Piezoprüfköpfen die Anregung von Schallwellen in axialer Richtung eines Spannstahles nur über eine der Stirnflächen möglich ist, erfolgt beim magnetostriktiven Verfahren die Ankopplung der spulenförmigen Prüfköpfe über die Mantelfläche und kann daher an jeder beliebigen Stelle vorgenommen werden. Bei entsprechender Auslegung der Spule läßt sich diese direkt an der Koppelstelle anlegen, ohne daß die Stabenden zugänglich sein müssen; denkbar ist z.B. eine Aufteilung in zwei Halbschalen.

Trotz einiger prinzipieller Vorzüge der schwingerlosen magnetostriktiven Ultraschall-Erzeugung für den speziellen Anwendungsfall der Prüfung von Spannstählen ist auch dieses Verfahren keineswegs als problemlos anzusehen. Die i.A. nicht oder nur größenordnungsmäßig bekannten magnetischen Parameter des Werkstoffs bestimmen entscheidend die Eigenschaften des von ihm gebildeten "US-Wandlers", wie z.B. Wirkungsgrad, maximal erreichbare Schallleistung u.ä.. Da das Prüfobjekt (hier Spannstahl) vorgegeben ist, muß sich jegliche Optimierung auf die Wandlerspulen sowie die Ansteuer- und Auswertelektronik beschränken. Dazu gilt es, die Spulen sowohl mechanisch als auch elektrisch zu dimensionieren, wobei die Randbedingungen durch den Durchmesser des jeweiligen Spannstahls, die gewünschte Wellenart und -länge sowie das ansteuernde US-Gerät gesetzt werden. Dieses wiederum muß Impulse geeigneter Form, d.h. Länge, Mittenfrequenz und Stromstärke liefern können. Auch für das überlagerte magnetische Gleichfeld, dessen Stärke den Wirkungsgrad der US-Wandlung beeinflusst, ist ein optimaler Wert zu finden (siehe 3.4). Die meisten der zu optimierenden Parameter sind materialspezifisch, müssen also u.U. für jede Spannstahlsorte neu bestimmt werden. Darüber hinaus sind einige Werte, wie Spulendurchmesser und Windungszahl, auch vom Durchmesser des Prüflings abhängig, was die Verhältnisse zusätzlich kompliziert. Als Orientierungshilfe ist daher zumindest die qualitative Kenntnis der Abhängigkeit der Längenänderung eines Materials von der Magnetfeldstärke sehr nützlich, zumal verschiedenen legierte und behandelte Stähle sich diesbezüglich sehr unterschiedlich verhalten können [4].

Weitere Schwierigkeiten, die allerdings von der Art und Weise der US-Anregung unabhängig sind, ergeben sich aus der Tatsache,

daß die US-Ausbreitung in langen, dünnen Stählen wesentlich komplizierteren Gesetzmäßigkeiten unterliegt, als im Fall eines in allen Richtungen ausgedehnten Körpers. Die Schallgeschwindigkeit ist nicht mehr konstant, sondern frequenzabhängig, scharfe Impulse werden infolge dieser Dispersionerscheinung "verschmiert". Zwar wurde die bis heute gültige Theorie der Schallausbreitung in Stäben bereits 1876 aufgestellt [5], doch existiert immer noch keine exakte, allgemeingültige Lösung der darin enthaltenen Differentialgleichungen. Bei Stäben, die von einem zweiten Material umgeben sind wie z.B. verpreßten Spannstählen, wurden bis jetzt nur für wenige Materialpaarungen Näherungsrechnungen durchgeführt, die für eine Kombination wie Stahl-Mörtel hohe Dämpfungswerte erwarten lassen (siehe 3.2).

3. Grundlagen

3.1 Allgemeines zur Ultraschallprüfung

Bei der Materialprüfung mittels Ultraschall-Impulsen werden üblicherweise folgende drei Parameter zur Auswertung herangezogen: Laufzeit, Dämpfung sowie spektrale Verteilung des empfangenen US-Signals. Dabei wird abhängig vom Prüfobjekt entweder in Durchschallungstechnik mit getrennten Sende- und Empfangswandlern gearbeitet oder in Echo-Impulstechnik, wobei ein Wandler beide Funktionen übernimmt.

Für die Laufzeit t gilt folgender Zusammenhang:

$$(1) \quad c = \frac{l}{t} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} c: \text{Schallgeschwindigkeit} \\ l: \text{Schallaufweg} \end{array}$$

Damit läßt sich bei bekannter Schallgeschwindigkeit c der Laufweg l ermitteln; dieser entspricht bei der Echo-Impulsprüfung dem doppelten Abstand des Wandlers zu einer reflektierenden Fläche. Hierbei kann es sich um die gegenüberliegende Oberfläche eines intakten Bauteils oder um eine Riß- bzw. Bruchfläche handeln, so daß bei bekannten Bauteilabmessungen solche Defekte einwandfrei festgestellt werden. Die Bedingung, daß hierzu die Bruchfläche in etwa senkrecht zur Schallrichtung verlaufen muß, ist bei axialer Durchschallung von Spannstählen infolge ihrer Geometrie und Belastungsrichtung praktisch immer erfüllt. Je nach Ausdehnung der Rißfläche erzeugt diese ein zusätzliches, vor dem Rückwandecho eintreffendes Signal, oder die Rückwand wird durch den Riß völlig abgeschattet, so daß nur noch das Rißecho zu beobachten ist.

Die Schallgeschwindigkeit ist nur bei reinen, kristallinen, unendlich ausgedehnten Materialien eine echte Konstante, ansonsten ist sie abhängig von Zusammensetzung, Gefüge, Dichte, Anisotropie, elastischen Eigenschaften u.s.w.. Sie kann innerhalb gewisser Grenzen als grobes Bewertungskriterium dieser Parameter herangezogen werden, wobei natürlich zur exakten Bestimmung von c der Schallweg l genau bekannt sein muß.

In einem Körper, dessen Abmessungen sehr groß gegen die Wellenlänge λ des Ultraschalls sind ("unendlich" ausgedehnt), existieren zwei unabhängige Wellenarten mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten. Bei der Longitudinalwelle (auch Kompressions- oder Dichtewelle) schwingen alle Teilchen in Fortpflanzungsrichtung, so daß sich im Material periodische Dichteschwankungen ergeben (Abb. 1a).

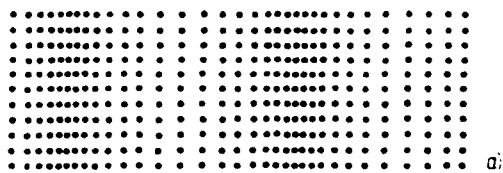
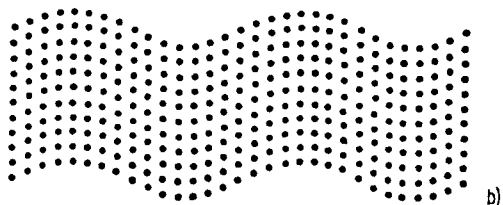


Abb. 1 a) Longitudinalwelle
 b) Transversalwelle
 nach [6]



Dagegen schwingen die Teilchen bei der Transversalwelle (auch Schub- oder Scherwelle) senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung; diese Wellenart tritt nur in Festkörpern auf, da Flüssigkeiten zwar Druck-, aber kaum Scherkräfte übertragen können.

Für die Schallgeschwindigkeiten c_L der Longitudinalwelle und c_T der Transversalwelle gilt

$$(2) \quad c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

E: Elastizitätsmodul

ρ : Dichte

μ : Poisson-Konstante

$$(3) \quad c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}}$$

Allgemein gilt der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit c , Wellenlänge λ und Frequenz f :

$$(4) \quad c = f \cdot \lambda$$

Die wichtigsten schalltechnischen Materialparameter für Stahl und Beton sind in Tab. 1 zusammengefaßt, wobei insbesondere die Werte für Beton nur als grobe Anhaltspunkte für einen durchschnittlichen B35 zu verstehen sind, da sowohl Dichte als auch Poisson-Konstante von verschiedenen Faktoren wie Zusammensetzung, W/Z-Wert, Verdichtungsgrad, Alter usw. abhängen.

Tab. 1

		Stahl	Beton	
Dichte	ρ	7,8	2,3	10^3 kg/m^3
E-Modul	E	2,05	0,34	10^5 N/mm^2
Poisson-Konstante	μ	0,29	0,20	
Longitudinalwelle	c_L	5,9	4,0	10^3 m/s
Transversalwelle	c_T	3,2	2,5	10^3 m/s
Oberflächenwelle	c_O	3,0	2,3	10^3 m/s
Dehnwelle	c_D	5,1	3,8	10^3 m/s

Während für reine Laufzeitmessungen einfach aufgebaute US-Geräte verwendet werden können, bei denen die Zeitdifferenz zwischen Sende- und erstem Empfangsimpuls elektronisch ausgewertet und digital angezeigt wird, sind für Dämpfungsmessungen Geräte notwendig, bei denen das Empfangssignal - meist gleichgerichtet und integriert - mit dem Verlauf seiner Amplitude über der Zeit auf einem Oszilloskopschirm dargestellt wird.

Die gesamte Abschwächung des US-Signals setzt sich zusammen aus der Ankoppeldämpfung, der Schallschwächung im Prüfkörper selbst sowie - im Falle der Echo-Impuls-Technik - der Reflexionsverluste an der rückwärtigen Probenoberfläche bzw. Bruchfläche. Die Koppeldämpfung kann, wenn sie wie im Fall der magnetischen Ankopplung konstant ist, vernachlässigt werden. Die Dämpfung im durchschallten Material wird im wesentlichen durch Streu- und Beugungseffekte an Korngrenzen und anderen Inhomogenitäten verursacht und läßt gewisse Rückschlüsse auf die innere Struktur des Materials zu. Aus der relativen Höhe eines Fehlerechos in Bezug auf das Rückwandecho kann größenordnungsmäßig die Ausdehnung der Fehlerfläche abgeschätzt werden.

Da die Dämpfung des Ultraschalls genau wie seine Geschwindigkeit im Normalfall frequenzabhängig ist, bietet sich als dritter Parameter bei der Auswertung des Empfangssignals die Spektralanalyse an. Die üblicherweise in der US-Materialprüfung verwendeten impulsförmigen Signale sind bezüglich ihrer spektralen Verteilung so breitbandig, daß das Übertragungsverhalten des Materials mit einer einzigen Messung über einen großen Frequenzbereich bestimmt werden kann. Die Interpretation der Ergebnisse ist jedoch recht kompliziert, so daß die Spektralanalyse zwar bei der Entwicklung von Prüfgeräten fast unverzichtbar geworden ist, in der Materialprüfung selbst aber erst wenig Verwendung findet.

3.2. Schallausbreitung in Stäben

3.2.1. Stäbe mit freien Oberflächen

Im Unterschied zum Fall des in allen Richtungen "unendlich" ausgedehnten Körpers können sich in einem Körper, der in einer bzw. in zwei Dimensionen begrenzt ist, Longitudinal- und Transversalwellen nicht mehr unabhängig voneinander ausbreiten. Bei jeder Reflexion einer Welle an der Oberfläche wird gleichzeitig auch die jeweils andere Wellenart erzeugt; das Resultat ist immer ein Gemisch beider Wellenarten, wobei - auf den zylindrischen Stab bezogen - lediglich das Verhältnis der Komponenten von axialer und radialer Teilchenbewegung variieren kann (s. Abb. 2). Alle Teilchen außerhalb der Achse bewegen sich auf in Achsenebene liegenden Ellipsen.

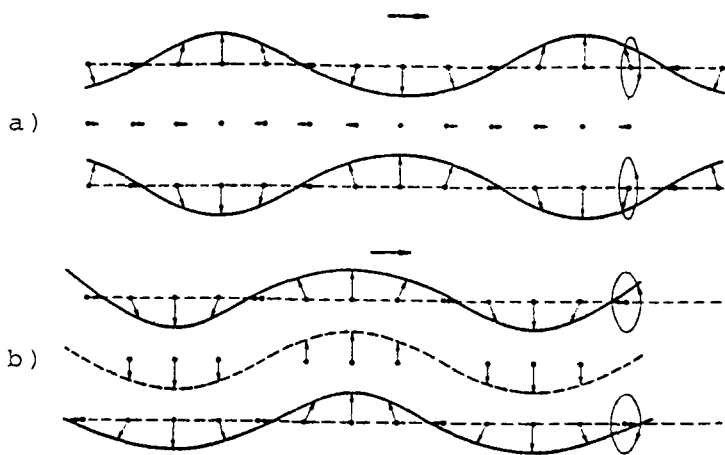


Abb. 2

- a) symmetrische Stabwelle
b) asymmetrische Stabwelle
nach [3]

Zur Klassifizierung unterscheidet man zwischen symmetrischen (auch Dehnwellen) und asymmetrischen Stabwellen (auch Biegewellen), jeweils bezogen auf die Stabachse. Die Teilchenbewegung in der Achse ist bei der Dehnwelle rein longitudinal, bei der Biegewelle rein transversal. Bei beiden Wellenarten konzentriert sich mit kleiner werdender Wellenlänge die Teilchenbewegung immer mehr auf eine dünne Schicht dicht unter der Oberfläche, so daß sich als Grenzfall eine reine Oberflächenwelle (auch Rayleigh-Welle) ergibt. Dabei befinden sich die Teilchen in einer Tiefe von etwa einer Wellenlänge unter der Oberfläche schon in Ruhe (s. Abb. 3.)

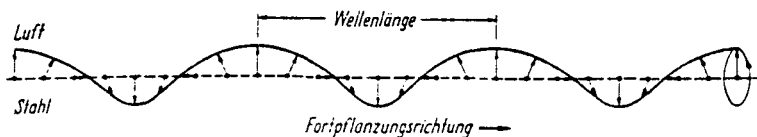


Abb. 3

- Oberflächenwelle
nach [3]

Zu der Klasse der achsensymmetrischen Wellen gehört auch die Torsionswelle, bei der die Teilchen sich weder in axialer noch in radialer, sondern nur in lateraler Richtung bewegen. Anschaulich läßt sich dies als Schwingung des in dünne Kreisscheiben unterteilten Stabes um seine Achse vorstellen.

Nur der Vollständigkeit halber erwähnt seien hier die sog. "Schraubenwellen", auf die aber nicht näher eingegangen werden soll (näheres siehe [7]).

Mit Ausnahme der Oberflächenwellen existieren für alle genannten Wellenarten neben den Grundschwingungen - oft als Wellenmoden 1. Ordnung bezeichnet - auch Moden höherer Ordnung, die sich von den Grundmoden durch eine größere Anzahl von Schwingungsknoten, d.h. Stellen ohne Teilchenauslenkung, unterscheiden (s. Abb. 4).

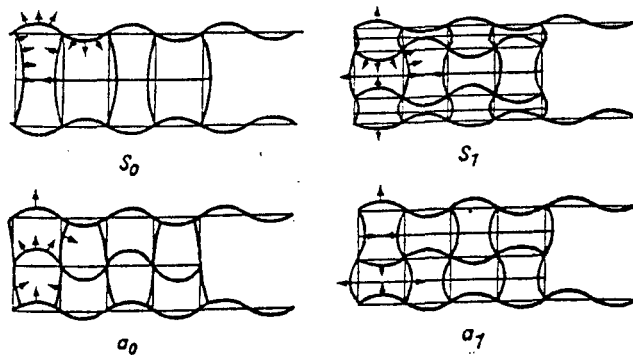


Abb. 4

s_0 : symmetrische Welle
1. Ordnung
 s_1 : symmetrische Welle
2. Ordnung
 a_0 : asymmetrische Welle
1. Ordnung
 a_1 : asymmetrische Welle
2. Ordnung,
nach [6]

Da mit steigender Ordnungszahl die Amplituden der einzelnen Moden stark abnehmen, sind für die US-Materialprüfung neben den Grundschwingungen i.A. nur noch die Moden 2. Ordnung von Interesse. Diese besitzen jedoch, wie auch alle höheren Moden, eine untere Grenzfrequenz, unterhalb derer sie nicht angeregt werden können. Lediglich die Grundschwingungen sind bis zu beliebig niedrigen Frequenzen, d.h. nach Gl. (4) sehr großen Wellenlängen, ausbreitungsfähig.

Die Schallgeschwindigkeiten sowohl der symmetrischen als auch der asymmetrischen Stabwelle sind stark frequenzabhängig; die in Tab. 1 angegebenen Werte c_D der symmetrischen Dehnwelle gelten nur für sehr niedrige Frequenzen. Außerdem ist wegen der starken Dispersion zu unterscheiden zwischen der Phasengeschwindigkeit c als der Ausbreitungsgeschwindigkeit kontinuierlicher Wellenzüge und der Gruppengeschwindigkeit u , mit der sich kurze Impulse fortpflanzen. Zwischen beiden besteht die Beziehung:

$$(5) \quad u = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda} \quad \lambda: \text{Wellenlänge}$$

Im dispersionslosen Fall, wenn die Phasengeschwindigkeit nicht mit der Wellenlänge variiert, sind c und u identisch.

In Abb. 5 sind für ein Material mit $\mu = 0,29$, also z.B. Stahl, die Dispersionskurven der ersten beiden symmetrischen sowie des ersten asymmetrischen Modes in normierter Form dargestellt. Die Geschwindigkeiten sind, bezogen auf die hier mit β bezeichneten Transversalwellengeschwindigkeit c_T , über der frequenzproportionalen Größe d/λ aufgetragen, wobei d den Stabdurchmesser bezeichnet. Auf der Ordinate ist mit v_b die Dehnwellengeschwindigkeit c_D bezeichnet, für die gilt:

$$(6) \quad c_D = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

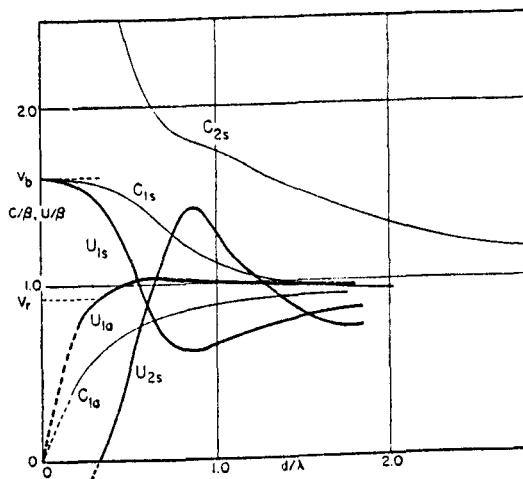


Abb. 5

Dispersionsdiagramm der Schallgeschwindigkeiten in Stahl nach [8]

c_D stellt den niederfrequenten Grenzwert der Phasengeschwindigkeit c_{1s} und der Gruppengeschwindigkeit u_{1s} der symmetrischen Grundwelle dar, während sich bei hohen Frequenzen beide der Oberflächenwellengeschwindigkeit v_r ($\approx c_0$) angleichen, die sich nach folgender Näherungsformel berechnen läßt [9]:

$$(7) \quad c_0 = c_T \frac{0,87+1,12\mu}{1+\mu}$$

Die Transversalwellengeschwindigkeit c_T entspricht dem Ordinatenwert 1; für Stahl mit $\mu = 0,29$ ergibt sich $c_0 = 0,92 c_T$.

Auch Phasen- und Gruppengeschwindigkeit c_{1a} und u_{1a} der asymmetrischen Grundwelle nähern sich bei hohen Frequenzen dem Wert c_0 , gehen aber für niedrige Frequenzen gegen Null.

Die Phasengeschwindigkeit c_{2s} des zweiten symmetrischen Modes strebt in der Nähe der Grenzfrequenz gegen unendlich und nähert sich für große d/λ -Werte asymptotisch der Transversalwellengeschwindigkeit c_T , ebenso wie die entsprechende Gruppengeschwindigkeit u_{2s} , die bei der Grenzfrequenz sogar negative Werte annimmt.

Da kurze US-Impulse sich nach dem Fourier-Theorem als aus mehreren kontinuierlichen Sinuswellen unterschiedlicher Frequenz zusammengesetzt behandeln lassen und ihre Einzelkomponenten sich infolge der Dispersion mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fortpflanzen, kommt es mit zunehmendem Schallaufweg zu einer Verbreiterung dieser Impulse. Dieses Zerfließen des US-Signals in einem dispersiven Medium bringt eine unvermeidliche Verschlechterung des Fehlerauflösungsvermögens mit sich.

Oberflächenwellen auf gekrümmten Flächen unterliegen ebenfalls einer, wenn auch schwachen Dispersion, wohingegen sich der 1. Mode der Torsionswellen unabhängig von der Frequenz mit der Geschwindigkeit c_T fortpflanzt, da die Torsion eine Translationsbewegung darstellt.

3.2.2. Ummantelte Stäbe

Den praktischen Bedingungen eines Spannstahls in einem fertigen Spannbetonbauwerk entspricht i.A. nicht der freiliegende, sondern der von einem zweiten Material mit gutem Verbund umschlossene Stab. Bei dem umgebenden Material handelt es sich in den meisten Fällen um Beton oder Verpreßmörtel (Spannglied mit Verbund), dessen Dicke als sehr groß gegenüber dem Stahldurchmesser angenommen werden kann, seltener um viskose Stoffe wie Fett oder Bitumen (Spannglied ohne Verbund) in relativ dünner Schicht.

Wegen des guten Verbundes sind Stab und Ummantelung akustisch gekoppelt; nahe der Grenzfläche sind die Teilchenbewegungen in beiden Materialien identisch. Auf welche Weise die Schallaus-

breitung im Stab durch die Ummantelung beeinflusst wird, läßt sich nicht pauschal bestimmen. Die möglichen Materialpaarungen lassen sich nach Thurston [7] in verschiedene Gruppen mit unterschiedlichem Verhalten unterteilen, wobei als Kriterium die zahlenwertmäßige Abstufung der beiden Transversal-Schallgeschwindigkeiten, der Oberflächenwellen-Geschwindigkeit des äußeren Materials sowie der Geschwindigkeit der Stoneley-Welle verwendet wird. Letztere tritt als Grenzflächenwelle an die Stelle der Oberflächenwelle beim freiliegenden Stab; sie ist allerdings nur unter ganz bestimmten Bedingungen ausbreitungsfähig, nämlich wenn sich die aneinandergrenzenden Materialien bezüglich der Verhältnisse ihrer Dichten und Schubmodule sehr ähnlich sind.

Die weitere Diskussion soll auf den hier interessierenden Fall der Materialpaarung Stahl (innen) - Beton (außen) beschränkt bleiben. Die Ausbildung einer Stoneley-Grenzflächenwelle ist in diesem Fall nicht möglich. Da der Beton als Außenmaterial die kleinere Transversalwellengeschwindigkeit besitzt (siehe Tab. 1), ergeben theoretische Berechnungen, daß auch keine anderen Moden mit ungedämpfter, auf den Stahlstab beschränkter Wellenausbreitung existieren.

Eine Berechnung der radialen und axialen Komponenten der Teilchenbewegung für die Gründwelle eines mit Beton ummantelten Stahls führt zu dem in Abb. 6 dargestellten Ergebnis. Die Teilchenauslenkung konzentriert sich auf eine dünne Schicht unterhalb der Oberfläche des Betonmantels, der den achtfachen Durchmesser des Stahls aufweist, während sie im Stahl ($r/a \leq 1$) praktisch verschwindet.

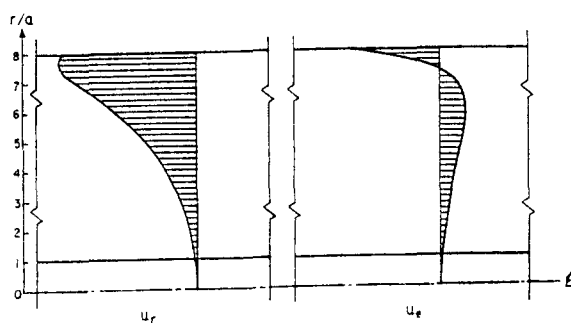


Abb. 6

Radiale Verteilung der radialen und axialen Teilchenauslenkung u_r und u_z eines mit Beton ummantelten Stahlstabes mit Radius a , nach [10].

Die Schwingungsenergie wird nach außen in den Beton abgegeben, wo sich im Fall eines endlichen Durchmessers der Ummantelung eine Oberflächenwelle ausbilden kann, während in einer "unendlich" dicken Betonschicht die Schallwellen sukzessive absorbiert werden. Die Dämpfung eines den Stahlstab durchlaufenden US-Signals ist also der Verpreßlänge proportional; da die Theorie aber keine Aussagen über das Ausmaß der Schallschwächung macht, müssen die maximal durchschallbaren Verpreßlängen experimentell bestimmt werden.

3.3. US-Erzeugung durch Magnetostriktion

Setzt man einen Körper aus ferromagnetischem Metall (Eisen, Nickel, Kobalt sowie deren Legierungen) bzw. aus Ferrit einem magnetischen Feld aus, so erfährt er in Richtung dieses Feldes eine Längenänderung δl . Diese kann sowohl positiv als auch negativ sein und ist von der Polarität des Feldes unabhängig. Ihre Größe hängt von der Materialzusammensetzung, seiner Vorbehandlung, Temperatur, mechanischen Spannung und anderen Parametern ab.

In Abb. 7 ist die statische Längenänderung $s = \delta l/l$ über der Feldstärke H für einige Materialien aufgetragen. Allen Kurven gemeinsam ist ein Sättigungseffekt bei hohen Feldstärken, wo die Stoffe ihre Sättigungsmagnetisierung erreichen.

Unter dem Einfluß eines magnetischen Wechselfeldes bilden sich im Material periodische Dichteschwankungen aus; es entsteht eine Longitudinal- bzw. Dehnwelle, die sich in Feldrichtung fortpflanzt und die doppelte Frequenz des Magnetfeldes besitzt. Das magnetische Wechselfeld wird durch eine von sinus- oder impulsförmigem Strom durchflossene Spule erzeugt (s. Abb. 8).

Abb. 7

Magnetostruktionskurven
verschiedener Ferromagnetika,
nach [11]

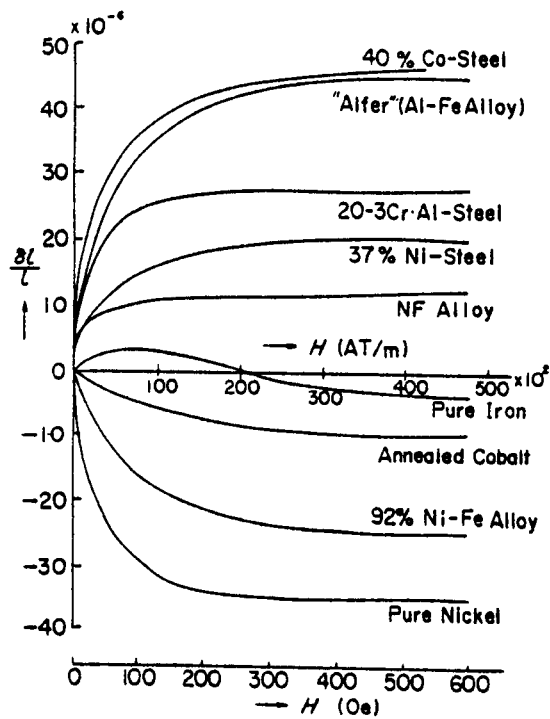
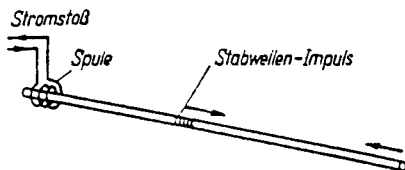


Abb. 8

Magnetostruktive US-Erzeugung
in Stabstahl, nach [3]



Durch Überlagerung eines zusätzlichen magnetischen Gleichfeldes läßt sich der Arbeitspunkt in den näherungsweise linearen Bereich der Kennlinie verschieben, wodurch Schall gleicher Frequenz erzeugt wird. Auch läßt sich damit der Wirkungsgrad der Schallwandlung beeinflussen, da dieser der Steilheit der Kennlinie im Arbeitspunkt proportional ist.

Da die Eindringtiefe des Magnetfeldes mit steigender Frequenz abnimmt (Skin-Effekt), findet die Schallanregung hauptsächlich dicht unter der Materialoberfläche statt; je nach angeregter Wellenart können sich die Schwingungen aber über das ganze Volumen verteilen [12].

Der hier beschriebene Mechanismus der elektromagnetischen US-Wandlung ist nicht nur zur Anregung, sondern auch zum Empfang von Schallsignalen verwendbar. Der zur Magnetostriktion reziproke magnetoelastische Effekt bewirkt im durchschallten Material Permeabilitätsänderungen als Folge der elastischen Spannungen. In einem äußeren Magnetfeld ergeben sich dadurch entsprechende Schwankungen des magnetischen Flusses, die in einer von ihm durchsetzten Spule eine den Schallschwingungen proportionale Spannung induzieren.

Wie bereits erwähnt, lassen sich nach dem Magnetostriktionsprinzip arbeitende US-Prüfköpfe herstellen; im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist jedoch ausschließlich die direkte Schallerzeugung im zu untersuchenden Material von Interesse, die nur bei ferromagnetischen Metallen möglich ist. Die im Prinzip ähnlich funktionierende elektrodynamische US-Anregung in elektrisch leitfähigen Materialien, die auf der Induktion von Wirbelströmen beruht, ist bei ferromagnetischen Metallen wegen des weit geringeren Wirkungsgrades i.A. nicht sinnvoll.

Obwohl in Abb. 7 die Längenänderung $\delta l/l$ über der Feldstärke H aufgetragen ist, stellt die Magnetisierung B die eigentlich maßgebliche Größe für die Magnetostriktion dar. B und H sind für jedes ferromagnetische Material über die sog. Hysteresekurve verknüpft, die wiederum in ihrem Verlauf stark von der mechanischen Beanspruchung des Probekörpers abhängig ist (siehe Abb. 9). Besonders ausgeprägt ist die Abnahme der Sättigungsmagnetisierung bei Dehnbeanspruchung, die zu einer Empfindlichkeitsreduzierung bei der magnetostriktiven US-Wandlung führt. Prinzipiell ließe sich damit die Vorspannung eingebauter Spannglieder mit Hilfe der US-Prüfung ermitteln; die praktische Anwendbarkeit dieses Effekts konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht untersucht werden.

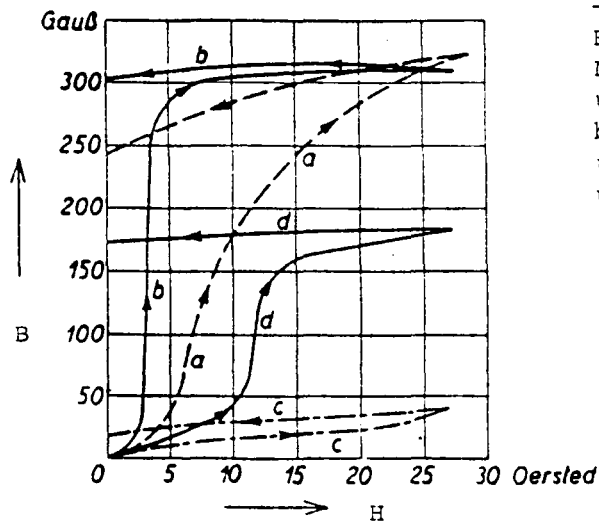


Abb. 9

Hysteresekurven von weichem Nickeldraht in mechanisch unbeanspruchtem Zustand (a), bei Torsion (b), bei Dehnung (c) und bei gleichzeitiger Torsion und Dehnung (d), nach [13]

3.4. Erzeugung des Prüfsignals

Bei der US-Materialprüfung in Echotechnik werden üblicherweise kurze, impulsförmige Signale verwendet, um Laufzeitmessungen mit hoher Genauigkeit auch über geringe Entfernungen vornehmen zu können; die Impulsdauer muß dazu kürzer sein als die kleinste mögliche Laufzeit, da sonst Sende- und Empfangsimpuls nicht zu trennen sind. Das beim magnetostriktiven Verfahren hierzu benötigte gepulste Magnetfeld wird durch einen entsprechenden Stromimpuls durch die Sendespule erzeugt. Da die magnetische Feldstärke in der Spule dem Produkt aus Windungszahl und Stromstärke proportional ist, die Windungszahl aber zur Vermeidung hoher Induktivität klein gehalten werden muß, sind zur Erzeugung starker Magnetfelder sehr hohe Ströme erforderlich, die jedoch nur kurzzeitig benötigt werden. Es liegt daher nahe, die benötigte elektrische Energie in der relativ langen Zeit zwischen zwei Sendepulsen zu speichern und dann in einem sehr kurzen Zeitraum an die Sendespule abzugeben. Als Speicherelement wird meist ein Kondensator verwendet, die Prinzipschaltung des Entladestromkreises ist in Abb. 10 dargestellt.

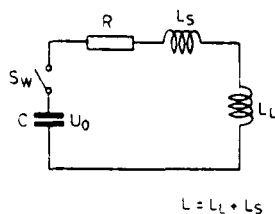


Abb. 10

LCR-Stromkreis in Serienschaltung, nach [14]

Der auf die Spannung U_0 aufgeladene Kondensator C wird über den Schalter S_W und die Zuleitung mit dem Widerstand R und der Induktivität L_S auf die Sendespule L_L entladen. Kritischstes Element der Anordnung ist der Schalter S_W , der den hohen Entladestrom in sehr kurzer Zeit einschalten muß. Bei geschlossenem Schalter handelt es sich um einen bedämpften Serienschwingkreis mit der Resonanzfrequenz:

$$(8) \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

Im üblichen Betriebsfall der unterkritischen Dämpfung ($0 \leq \gamma < 1$ mit $\gamma = \frac{1}{2} R \sqrt{C/L}$) hat der Strom durch die Sendespule die Form einer gedämpften Sinusschwingung mit exponentiell abklingender Amplitude. Die erste Periode dieser Schwingung ist in Abb. 11 für verschiedene Werte von γ dargestellt.

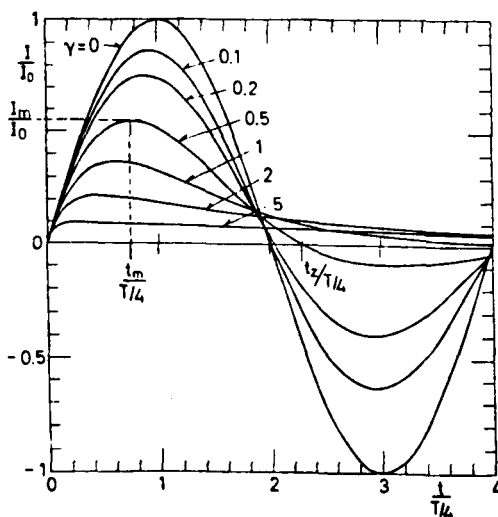


Abb. 11

Spulenstrom für verschiedene γ -Werte nach [14]

Die Kurve mit $\gamma = 0$ entspricht dem Grenzfall einer völlig ungedämpften, reinen Sinusschwingung; in der Praxis werden Signale mit γ -Werten von 0,1...0,5 verwendet. Sie enthalten wie alle nichtharmonischen Schwingungen neben der Resonanzfrequenz (s. Gl. (8)) ein ganzes Spektrum weiterer Frequenzen, hauptsächlich wegen des Sprungs im Stromverlauf bei $t = 0$ (Schließen des Schalters S_W), stellen also breitbandige Signalformen dar.

Will man gezielt ein schmalbandiges Spektrum mit definierter Mittenfrequenz anregen, so benötigt man ein Signal, dessen Amplitude nicht nur langsam abklingt, sondern vorher auch genauso langsam und stetig ansteigt (siehe Abb. 12).



Abb. 12

Schmalbandiger Sendeimpuls
nach [3]

Derartige Signalformen sind aber bei den für das magnetostruktive US-Verfahren benötigten hohen Stromstärken schwierig zu erzeugen.

4. Meßapparatur

4.1. Ultraschallgerät "Ferrotron"

Zur Erzeugung und Auswertung der US-Signale wurde ein von der Firma Dr. J. u. H. Krautkrämer, Köln vertriebenes, mittlerweile nicht mehr im Handel befindliches Gerät vom Typ "Ferrotron" verwendet (siehe Abb. 13). Das zweiteilige Gerät wurde ursprünglich zur Fertigungsüberwachung von Stahlstäben und -drähten entwickelt [12], erwies sich aber auch als für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchzuführenden orientierenden Messungen geeignet.

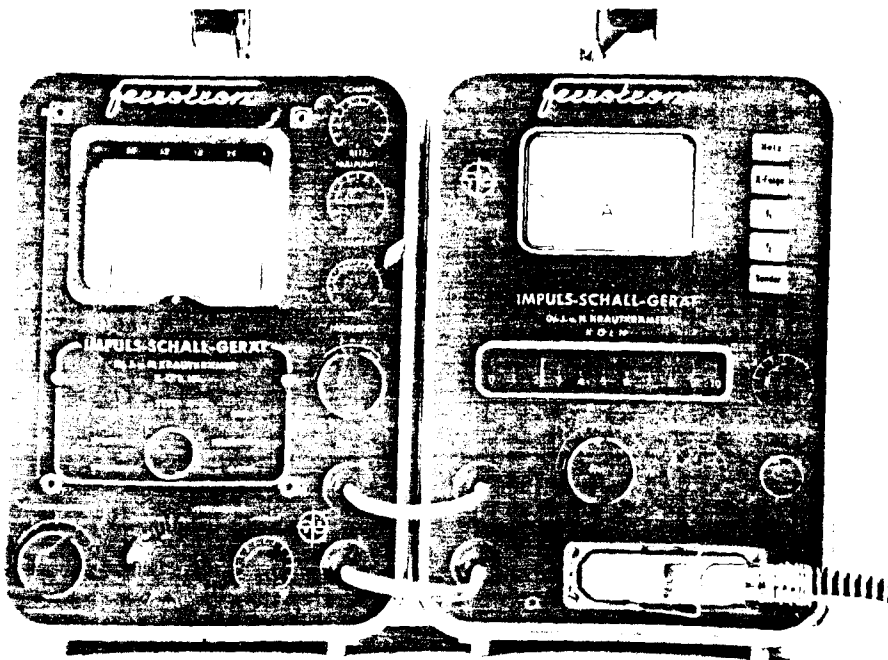


Abb. 13

Magnetostruktions-
US-Gerät
Ferrotron

4.1.1. Sender Type S2

Die zur Ansteuerung der Sendespule benötigten Stromimpulse werden im Gerät S2 (Abb. 13 rechts) durch Aufladen eines Kondensators auf ca. 2 kV und anschließendes Entladen über eine getriggerte Funkenstrecke auf die Sendespule erzeugt. Die Einstellung der Impulsfrequenz erfolgt in sieben Stufen durch Abstimmspulen, die zur Sendespule parallel geschaltet werden können und über verschiebbare Kerne kontinuierlich in ihrer Induktivität durchstimmbare sind. Allerdings geht dabei ein gewisser Teil der Sendenergie in den Abstimmspulen verloren. Der Frequenzbereich, der auch von der Induktivität der Sendespule abhängig ist, reicht von ca. 300 kHz bis ca. 1,5 MHz. Die Impulsfolgefrequenz ist zwischen 1 Hz und 100 Hz einstellbar; die maximale Stromstärke beträgt etwa 200 A.

Das Sendegerät enthält zusätzlich eine einstellbare Gleichspannungsquelle zur Versorgung der Spule für die Gleichfeldmagnetisierung, wofür maximal 5A bei ca. 20 V zur Verfügung stehen. Sämtliche Verbindungsleitungen zu den Wandlerwindungen sind über eine 16-polige Steckerleiste geführt.

4.1.2. Empfänger Type A

Das Empfangsgerät besteht im wesentlichen aus einem frequenzselektiven Verstärker und einer Oszilloskopröhre mit zugehöriger Zeitbasis. Die Empfangsspule wird mit einem Drehkondensator zu einem abstimmbaren Parallelschwingkreis zusammengeschaltet, der auf die Frequenz dem Empfangssignals eingestellt wird und so eine höhere Empfindlichkeit ergibt bzw. störende Frequenzanteile unterdrückt. Eine weitere Selektion ermöglicht der schmalbandige, in fünf Stufen durchstimmbare Verstärker mit seiner kalibrierten, von 0...80 dB reichenden Verstärkungseinstellung. Die Amplitude des Empfangssignals wird in gleichgerichteter und integrierter Form über der Laufzeit auf dem Bildschirm dargestellt; die Zeitachse ist allerdings direkt in Meter skaliert, weswegen die jeweilige Schallgeschwindigkeit als Skalenfaktor am Gerät eingestellt werden muß. Der Meßbereich erstreckt sich von 0,25 m bis 20 m. Die Zeitbasis wird durch den Sendeimpuls getriggert, so daß dieser immer am linken Bildschirmrand erscheint.

4.2. Wandler­spulen

Die Optimierung der geometrischen und elektrischen Spulendimensionen wurde auf experimentellem Weg für die Stabdurchmesser 7,0 mm und 12,2...12,5 mm durchgeführt, indem die Parameter Durchmesser, Länge, Drahtstärke und Windungszahl in durch überschlägige Berechnung festgelegten Bereichen variiert wurden. Verwendet wurden teilweise Spulenkörper von Schalenkernen, teilweise PVC-Rohre passenden Durchmessers sowie handelsüblicher Kupferlackdraht.

4.2.1. Sendespulen

Die Sendespulen konnten nur einlagig gewickelt werden, da sonst infolge der hohen Spannungsimpulse Funkenüberschläge auftraten. Als optimale Länge ergab sich in etwa die Wellenlänge der angeregten Schwingung; damit konnten Windungszahl und Drahtstärke nicht mehr unabhängig voneinander gewählt werden, so daß ein Kompromiß zwischen niedriger Induktivität und geringem ohmschen Widerstand zu schließen war. Der Durchmesser wurde so gewählt, daß sich die Sendespule konzentrisch über die Empfangsspule schieben ließ (siehe Abb. 14, links), der genaue Wert erwies sich bei dieser Anordnung, die bessere Ergebnisse brachte als nebeneinander liegende Spulen (siehe Abb. 14, rechts unten) als relativ unkritisch. Die Dimensionen der optimierten Spulen sind Tab. 2 zu entnehmen.

Tab. 2: Spulendimensionen

	Sendespule		Empfangsspule	
Stabdurchmesser [mm]	7,0	12,2	7,0	12,2
Durchmesser, innen [mm]	15	20	8,5	14
Länge [mm]	11	12	4	4
Windungszahl	40	22	125	125
Drahtstärke [mm]	0,25	0,5	0,1	0,15

4.2.2. Empfangsspulen

Die Empfangsspulen sollten wesentlich kürzer als die Wellenlänge sein, um möglichst scharfe Impulse zu liefern; dem entgegen stand die Forderung nach hoher Windungszahl im Interesse großer Signalamplituden. Es konnte mehrlagig gewickelt werden, obwohl bei zu geringen Drahtstärken vereinzelt ebenfalls Funkenüberschläge auftraten und die Spulen zerstörten. Der Durchmesser sollte so gering wie möglich sein, da mit wachsendem Luftspalt zwischen Stahl und Spule die Empfindlichkeit beträchtlich zurückging. Die Daten der für die meisten Messungen verwendeten Empfangsspulen sind in Tab. 2 angegeben.

4.3. Gleichfeldmagnetisierung

Zur Erzeugung des überlagerten Gleichmagnetfeldes wurden meist aus Trafoblechen zusammengesetzte U-Kerne mit entsprechend dem Stahldurchmesser durchbohrten Schenkeln verwendet, die mit einer Wicklung aus 1 mm CuL versehen waren. Da sie zusammen mit dem Stahl einen geschlossenen magnetischen Kreis bildeten, benötigten sie für eine vorgegebene Magnetisierung die geringste Stromstärke (siehe Abb. 14, links und Abb. 15).

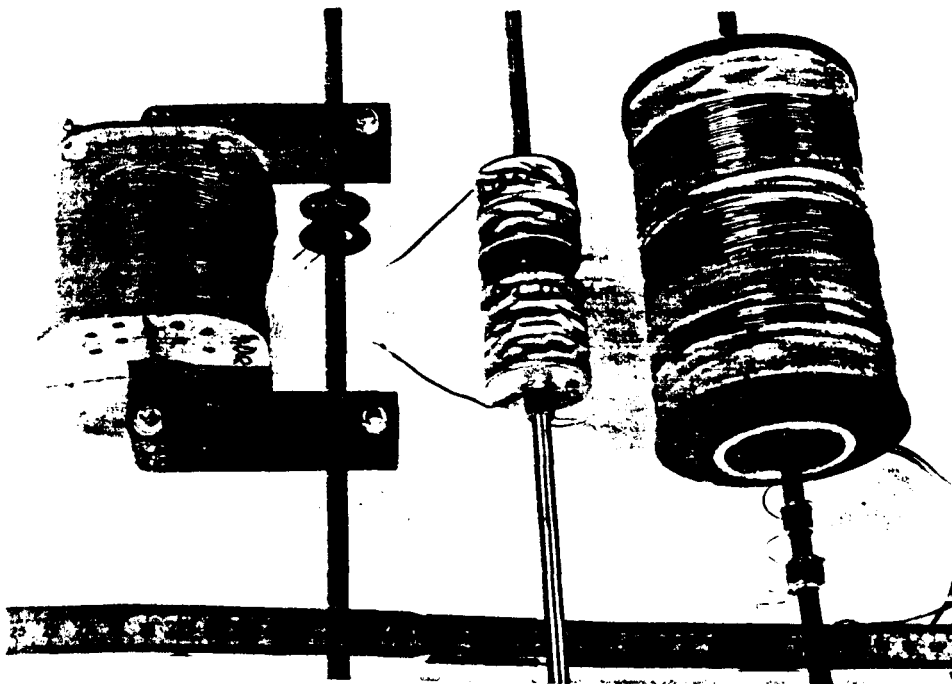


Abb. 14

Verschiedene
Wandler- und
Gleichfeldmag-
netisierungs-
spulen für
Stähle mit
7 mm \varnothing

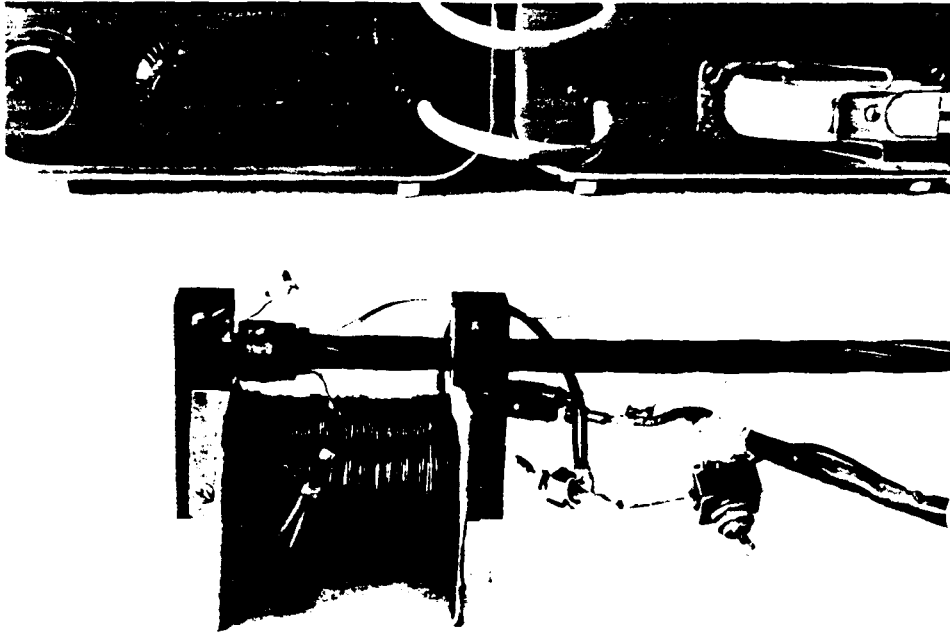


Abb. 15

Spulenanordnung
für Messung an
einer 7-dräht.
1/2"-Litze;
U-Kern und
konzentrische
Wandlerspulen

Alternativ wurden auch zylindrische Luftspulen verwendet, die über den Stahl geschoben wurden. Abb. 14 Mitte zeigt eine sehr kompakte Anordnung, bei der zwei in Reihe geschaltete Gleichfeldspulen mit den dazwischenliegenden, konzentrisch angebrachten Wandlerspulen auf ein gemeinsames Trägerrohr gewickelt sind.

Die in Abb. 14 rechts gezeigte Spule wurde hauptsächlich während der Optimierungsversuche benutzt, da sie wegen ihres großen Innendurchmessers die Aufnahme der verschiedensten Wandlerspulen gestattete.

Infolge der konzentrischen Anordnung von Sende- und Empfangsspule war das überlagerte Gleichmagnetfeld für beide identisch. Versuche mit nebeneinanderliegenden Wandlerspulen und getrennter Magnetisierung ergaben jedoch keine Vorteile, die den erheblichen Mehraufwand gerechtfertigt hätten.

4.4. Spulenanordnung

Die Anordnung der Wandler­spulen auf dem zu untersuchenden Stahl­stab ist abhängig davon, ob in Echotechnik oder mit direkter Durchschallung gearbeitet werden soll.

4.4.1. Direkte Durchschallung

Zur direkten Durchschallung des Stahls sind die Sende- und Empfangsspule in hinreichendem Abstand voneinander anzuordnen, so daß der US-Impuls den dazwischenliegenden Bereich durchlaufen muß (siehe Abb. 16a). Werden beide Spulen in einem definierten Abstand zueinander fixiert und gemeinsam über den Stahl geschoben, so sind wegen der konstanten geometrischen Verhältnisse Abweichungen der Laufzeit oder der Amplitude vom Sollwert besonders einfach festzustellen. Risse im Stahl machen sich durch Abschwächung oder völliges Ausbleiben des Empfangssignals bemerkbar. Das Verfahren ist in dieser Form allerdings nur bei über die gesamte Meßlänge zugänglichen Stählen anwendbar; eingebaute Spannstähle sind i.A. lediglich an den Enden zugänglich und können somit nur im Ganzen durchschallt werden. Nachteilig sind dabei die notwendigen langen Kabelverbindungen zu mindestens einer der Spulen, außerdem sind getrennte Gleichfeldmagnetisierungseinheiten erforderlich.

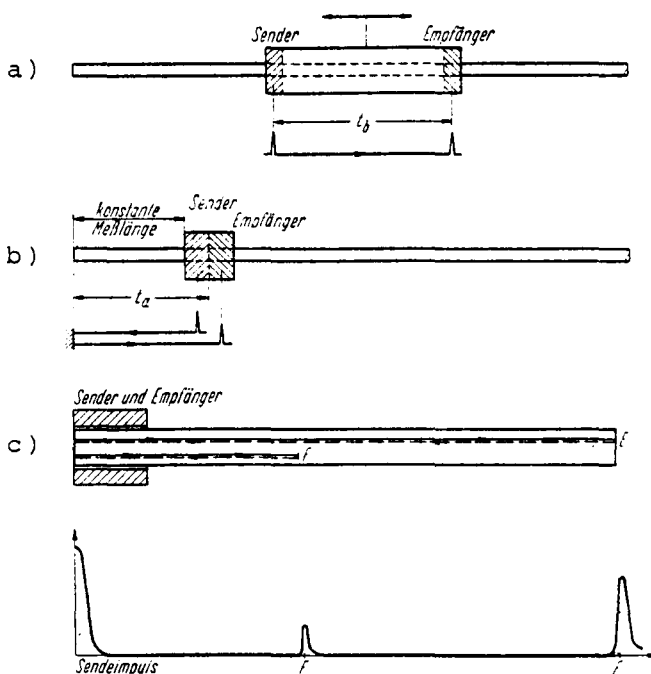


Abb. 16

Verschiedene mögliche Anordnungen der Wandler­spulen, nach [4]

4.4.2. Echotechnik

Bei Anwendung der Echotechnik lassen sich beide Wandler­spulen zu einer kompakten Einheit zusammenfassen, die bei konzentrischer Anordnung wegen des fehlenden axialen Versatzes wie ein piezo­elektrischer S/E-Prüfkopf betrachtet werden kann. Da die Schall­abstrahlung symmetrisch in beide Richtungen des Stahles erfolgt, werden auch von beiden Stirnflächen Echoimpulse reflektiert. Auf dem Bildschirm kann die Richtung der Empfangsimpulse nicht unterschieden werden, so daß die eindeutige Zuordnung der dar­gestellten Impulse zu den entsprechenden Reflektorflächen Schwie­rigkeiten bereiten kann. Eine einseitige Schallabstrahlung läßt sich nur mit aufwendigen Phased-Array-Spulen erreichen.

Günstiger als eine Anordnung gemäß Abb. 16b ist daher die Positionierung der S/E-Spule an einem Ende des Stabe, von wo aus sich der Schall naturgemäß nur in einer Richtung ausbreiten kann (siehe Abb. 16c). Dabei ist zu beachten, daß es zwischen dem direkt in den Stab laufenden Wellenzug und dem vom linken Stabende - bezogen auf Abb. 16 - reflektierten Signal zu Inter­ferenzerscheinungen kommt, da die Laufzeitdifferenz kleiner als die Impulslänge ist. Das Spulenpaar muß daher sehr sorgfältig positioniert werden, damit nicht statt einer durchaus erwünschten Amplitudenerhöhung durch konstruktive Interferenz eine starke Dämpfung infolge teilweiser Auslöschung eintritt. Bei geschickter Wahl des Abstandes Spulenmitte-Stabende erwies sich diese An­ordnung als Optimum bezüglich Wirkungsgrad und Fehlerauflösung.

5. Messungen

Zur Charakterisierung der Schallausbreitung in den untersuchten Spannstahlabschnitten wurden die Parameter Schallgeschwindigkeit, Wellenlänge und Dämpfung bestimmt. Die dazu benutzten Meßmethoden sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

5.1. Dämpfung

Als Maß für die Dämpfung des US-Impulses wurde die Amplitude des Empfangssignals herangezogen; dazu wurde am Empfangsgerät Typ A die Verstärkung so eingestellt, daß der stärkste Empfangs­impuls - oder ein anderes charakteristisches Signal - gerade

die volle Bildschirmhöhe erreichte. Da der Verstärkungseinsteller in 2 dB-Schritten kalibriert war, konnten mit identischen Spulen ermittelte Werte untereinander verglichen werden, obwohl es sich um eine Relativmessung handelt. Absolute Amplitudenmessungen waren nicht möglich, da der OdB-Punkt geräteintern willkürlich festgelegt ist. Die Dämpfungswerte von Stäben mit unterschiedlichen Durchmessern sind nicht vergleichbar, da sie notwendigerweise mit verschiedenen Spulen ermittelt wurden, deren Daten die Empfindlichkeit des Gerätes beeinflussen.

Wegen der berührungslosen Ankopplung waren die Dämpfungswerte sehr gut reproduzierbar. Örtliche Amplitudenschwankungen ergaben sich nur als Folge von Interferenzerscheinungen in der Nähe der Enden bzw. der Mitte des Stabes (siehe 4.4.2. bzw. 5.3).

5.2. Schallgeschwindigkeit

Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit nach Gl. (1) wurde die Impulslaufzeit bei bekanntem Weg gemessen. Hierzu konnte die Bildschirmanzeige des Ferrotron-Gerätes nicht verwendet werden, da dessen x-Ablenkung direkt in Entfernungseinheiten skaliert ist (siehe 4.1.2). Das aufbereitete Empfangssignal wurde daher ausgekoppelt und parallel auf dem Schirm eines Laboroszilloskops mit kalibrierter Zeitablenkung dargestellt. Der Zeitabstand zwischen Sendeimpuls und Echosignal wurde entweder vom Bildschirmraster abgelesen oder als Periodendauer eines mit der Echofolge synchronisierten Rechtecksignals quatzgenau gemessen. Auf diese Weise konnte die Schallgeschwindigkeit mit einem Fehler von max. 2 - 3 % ermittelt werden.

5.3. Wellenlänge

Bei kontinuierlichen Schwingungen läßt sich die Wellenlänge nach Gl. (4) aus Schallgeschwindigkeit und Frequenz berechnen. Für kurze Impulse versagt diese Methode jedoch, da sich keine eindeutig definierte Frequenz, sondern nur ein mehr oder weniger breites Spektrum angeben läßt. Zur Bestimmung der Wellenlänge wurden daher hier die bereits erwähnten Interferenzerscheinungen

ausgenutzt, indem die Wandlerspulen genau in die Mitte des jeweiligen Stabes geschoben wurden, wo die Echoimpulse von beiden Enden gleichzeitig eintreffen und sich überlagern. Durch leichte axiale Verschiebung der Spulen ergeben sich abwechselnd Maxima und Minima des Empfangssignals, wobei sich zeigen läßt, daß der Abstand der Orte zweier benachbarter, gleichartiger Extrema einem Viertel der Wellenlänge λ entspricht. Die Interferenz führt infolge der nichtharmonischen Signalform nur zu unvollständiger Auslöschung bzw. Verstärkung, so daß die Extrema nicht sehr scharf ausgebildet sind. Für die Meßwerte der Wellenlängen ist daher ein Fehler in der Größenordnung von 10 % anzusetzen.

6. Ergebnisse

Es wurden die in 5. beschriebenen Messungen an fehlerfreien und an mit künstlichen Fehlern versehenen Spanndrähten und -litzen durchgeführt sowie Dämpfungsmessungen an verpreßten Spannstählen vorgenommen. Die auf dem Oszilloskopschirm dargestellten Empfangssignale wurden zur Auswertung und Dokumentation mit einer Sofortbildkamera fotografisch festgehalten. Die wichtigsten Meßwerte sind für die fehlerfreien, nicht ummantelten Proben in Tab. 3 zusammengefaßt; eine ausführliche Erläuterung sämtlicher Ergebnisse wird im folgenden, nach den Untersuchungsbedingungen getrennt, durchgeführt.

6.1. Freiliegende Spannstähle und -litzen

Um die grundsätzliche Eignung der magnetostriktiven US-Prüfung von Spanngliedern zu untersuchen, wurden zunächst Messungen an nicht ummantelten Stählen und Litzen vorgenommen.

Tabelle 3

Material	d [mm]	c[10 ³ m/s]	λ[mm]	d/λ
Spannstahl (Kerndraht der 1/2"-Litze)	4,1	5,1	14	0,3
Spannstahl St 1570/1770-5,0-rund, glatt	5,0	4,7	14	0,4
Spannstahl St 1470/1670-7,0-rund, glatt	7,0	4,3	8,0	0,9
Spannstahl St 1375/1670-12,2-rund, glatt	12,2	4,2	8,5	1,4
Spannstahl St 1420/1670-12,2-rund, glatt	12,2	4,3	8,5	1,4
Spannlitze 1/2", 7-dräht. St 1570/1770	12,5	4,8	12	0,4
Nickel	7,0	4,4	8,0	0,9

6.1.1. Freiliegende Spannstähle ohne Fehler

Als Probenmaterial standen glatte, runde Spannstahlabschnitte von 1000...2600 mm Länge in den Durchmessern 4,1 mm, 5,0 mm, 7,0 mm und 12,2 mm zur Verfügung, deren Enden senkrecht zur Stabachse plangeschliffen waren. Bei dem 4,1 mm-Draht handelte es sich um den Kerndraht einer 1/2"-Litze. Sämtliche Stähle waren kaltgezogen, zusätzlich wurden Messungen an vergütetem Stahl mit 12,2 mm Ø sowie an Nickelstäben mit 7,0 mm Ø durchgeführt. Nickel zeigt das ausgeprägteste magnetostriktive Verhalten aller reinen Metalle und ist daher diesbezüglich seit langem gründlich erforscht.

Alle Stahlproben ließen sich einwandfrei durchschallen, wobei sich keine signifikanten Unterschiede zwischen verschiedenen Durchmessern oder unterschiedlicher Vorbehandlung bei der Herstellung zeigten. Gegenüber reinem Nickel ergaben sich bei Spannstahl unter ansonsten gleichen Bedingungen um ca. 12 dB geringere Amplituden des Empfangssignals, die durch entsprechend höhere Verstärkung ohne nennenswerten Verlust am Signal-Rauschverhältnis kompensiert werden konnten. Die Dämpfung des Schalls entlang des Laufweges erwies sich als recht gering, so daß für die Durchschallung von Stählen in praxisähnlichen Längen von mehreren zehn Metern keine unüberwindlichen Schwierigkeiten zu erwarten sind. Allerdings machten sich Reflexionsverluste an weniger sorgfältig bearbeiteten Stirnflächen bemerkbar. Die Messungen an den Drähten mit 4,1 mm und 5,0 mm Ø wurden mit

den für 7mm-Stähle dimensionierten Spulen durchgeführt, wobei die Empfindlichkeit des Ferrotron-Gerätes drastisch zurückging; die angegebenen Meßwerte sind daher unter Vorbehalt zu betrachten.

Die ermittelten Schallgeschwindigkeiten zeigen zwar die nach Abb. 5 zu erwartende Tendenz, mit steigendem Stabdurchmesser, also größeren d/λ -Werten abzunehmen, liegen aber besonders bei den Stählen mit 7,0 mm und 12,2 mm \varnothing zu hoch, um der symmetrischen Grundwelle zugeordnet werden zu können. Parallel durchgeführte Messungen mit einem piezoelektrisch arbeitenden US-Gerät mit Prüfköpfen für 1 MHz und 2 MHz ergaben noch höhere Schallgeschwindigkeiten, die teilweise sogar oberhalb von $c_D = 5,1 \cdot 10^3$ m/s lagen; es muß daher vermutet werden, daß eine Dehnwelle 2. oder noch höherer Ordnung angeregt wurde.

In Abb. 17 ist das Empfangssignal eines 12,2 mm-Stahles dargestellt. Man erkennt als scharfe Peaks die ersten vier Echos einer Welle mit $c = 4,2 \cdot 10^3$ m/s und der Wellenlänge $\lambda = 8,5$ mm. Dazwischen sind sehr schwach und unscharf die ersten beiden Echos einer Schwingung mit etwa $3 \cdot 10^3$ m/s Schallgeschwindigkeit und $\lambda = 12$ mm zu erkennen. Dabei handelt es sich vermutlich um die asymmetrische Grundwelle, die evtl. infolge einer gegen die Stabachse leicht gekippten Sendespule mit angeregt wurde.

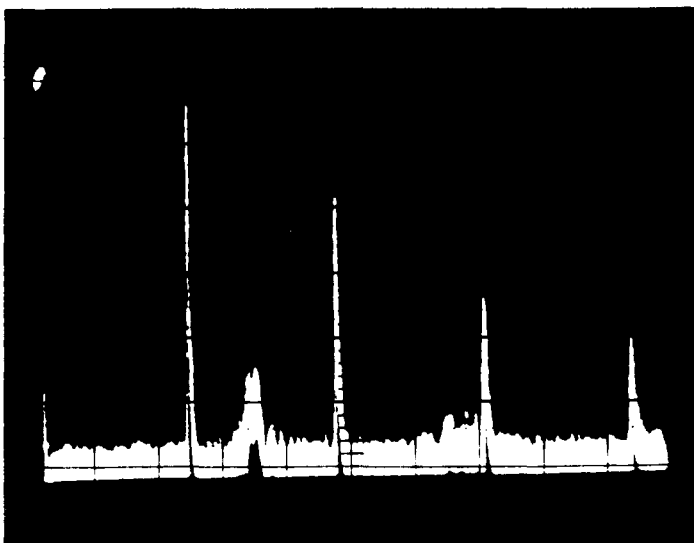


Abb. 17

Empfangssignal eines
12,2 mm-Spannstahls
von 2415 mm Länge
Zeitachse: 0,5 ms/Skt

Die Amplitudendifferenz zweier aufeinander folgender Echoimpulse beträgt etwa 3 dB; da dieser Wert einer Laufwegdifferenz von der doppelten Stablänge entspricht, ergibt sich ein Dämpfungsfaktor von ca. 0,6 dB/m bei Vernachlässigung der Reflexionsverluste an den Enden.

6.1.2. Freiliegende Spannstähle mit künstlichen Fehlern

Um zum einen die Nachweisbarkeit von Anrissen, zum anderen den Beitrag der oberflächennahen Bereiche zur Schallausbreitung untersuchen, wurde in Stähle mit 7,0 mm und 12,2 mm \varnothing je eine ca. 1 mm breite Nut entlang einer Umfangslinie eingesägt. Schon bei einer Tiefe von 10 % des Stabdurchmessers erzeugt diese Nut ein Echosignal, dessen Amplitude größer ist als die des um ca. 8 dB abgeschwächten Stirnflächenechos. Nach Vertiefung der Nut auf 15 % des Stabdurchmessers entsprechend einer Halbierung der Querschnittsfläche erreichte das "Fehlerecho" die Höhe des ursprünglichen Stirnflächenechos vor dem Ansägen, während dieses unter die Nachweisgrenze abgeschwächt wurde; das US-Signal verhielt sich so, als sei der Stahl an der Stelle der Nut völlig durchgesägt worden.

Abb. 18 zeigt das Empfangssignal eines 7,0 mm-Stahls von 1419 mm Länge, der 400 mm vor dem hinteren Ende mit einer rundum laufenden Nut von 1,0 mm Tiefe versehen war. An der mit E bezeichneten Stelle erschien vor dem Einsägen das Stirnflächenecho, F und F_2 sind die Echos der Nut nach ein- bzw. zweimaliger Reflexion.

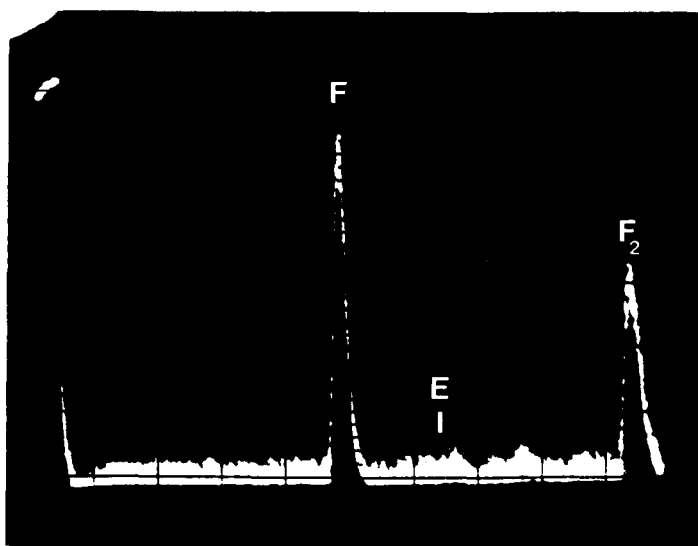


Abb. 18

Empfangssignal eines
7,0 mm-Stahls mit
1 mm Ringnut
Zeitachse: 0,1 ms/Skt

Diese Ergebnisse zeigen, daß der größte Teil der Schallenergie in den oberflächennahen Schichten eines Rundstabes transportiert wird und stimmen darin mit theoretischen Berechnungen der radialen Teilchenauslenkungsverteilung überein, welche für höhere Frequenzen einen ähnlichen Verlauf hat wie die in Abb. 6 dargestellte Verteilung für einen betonummantelten Stahlstab [15].

Eine hohe Nachweisgenauigkeit für Anrisse senkrecht zur Stabachse kann damit als gesichert gelten, da diese meist von der Oberfläche ausgehen. Inwieweit andere querschnittvermindernde Fehlerstellen, z.B. Rostnarben, nachweisbar sind, konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht überprüft werden.

6.1.3. Freiliegende Spannlitzen ohne Fehler

Die US-Prüfung von Litzen gestaltet sich mit herkömmlichen Piezoprüfköpfen besonders schwierig, da es auch bei sorgfältiger Bearbeitung der Stirnflächen nahezu unmöglich ist, eine gleichgute Ankopplung an alle Litzendrähte gleichzeitig zu erreichen. Bei der magnetostriktiven US-Erzeugung ergibt sich dies automatisch, da alle Drähte dem gleichen Magnetfeld ausgesetzt sind; eine Ausnahme macht nur der von den Außendrähte abgeschirmte Kerndraht. Die Messungen wurden mit den für 12,2 mm-Stähle optimierten Spulen an einer 7-drähtigen 1/2"-Litze von 1297 mm Länge durchgeführt. Gegenüber den Vollstäben ergab sich eine um ca. 12 dB geringere Empfindlichkeit, was die Auswertbarkeit der Signale jedoch kaum beeinträchtigte (siehe Abb. 19).

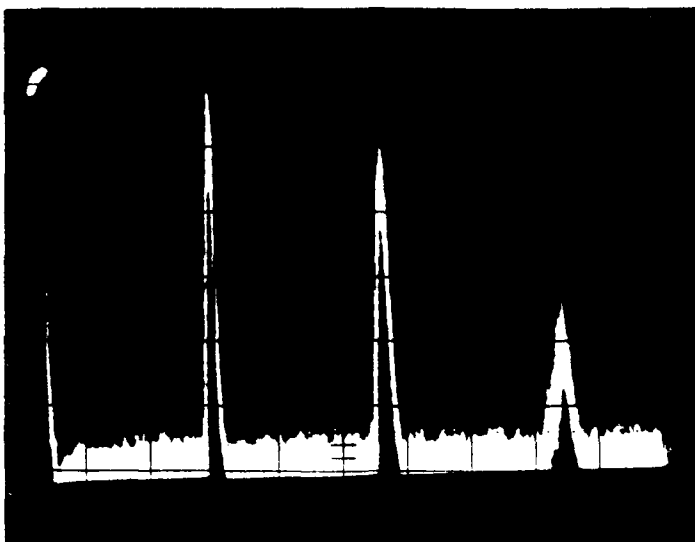


Abb. 19

Empfangssignal einer
1/2"-Litze
Zeitachse: 0,2 ms/Skt

Die Meßwerte für Schallgeschwindigkeit und Wellenlänge entsprachen dem Durchmesser der Einzeldrähte von 4,25 mm; sie lagen zwischen den Werten der 4,1 mm- und der 5,0 mm-Drähte.

Die Litze verhält sich schalltechnisch also wie ein Bündel voneinander unabhängiger Einzeldrähte. Die gegenüber Vollstäben reduzierte Meßempfindlichkeit dürfte auf die schlechtere Ausnutzung der Spulenquerschnittsfläche zurückzuführen sein, da ein ähnlicher Effekt bei Vollstäben auftritt, wenn Spulen mit zu großem Luftspalt verwendet werden.

6.1.4. Freiliegende Spannlitzen mit künstlichen Fehlern

Bei Spannlitzen kann es aufgrund von Korrosionsschäden oder unsachgemäßer Behandlung zum Bruch einzelner Drähte kommen, was, solange die restlichen Drähte die zusätzliche Last aufnehmen können, von außen kaum zu überprüfen ist. Um die Nachweisbarkeit solcher Schäden mittels magnetostriktiver US-Prüfung zu untersuchen, wurden bei der Litze aus Abb. 19 in 442 mm Entfernung vor dem hinteren Ende zwei der sechs Außendrähte durchtrennt. Das danach erhaltene Empfangssignal bei um 4 dB erhöhter Verstärkung zeigt Abb. 20.

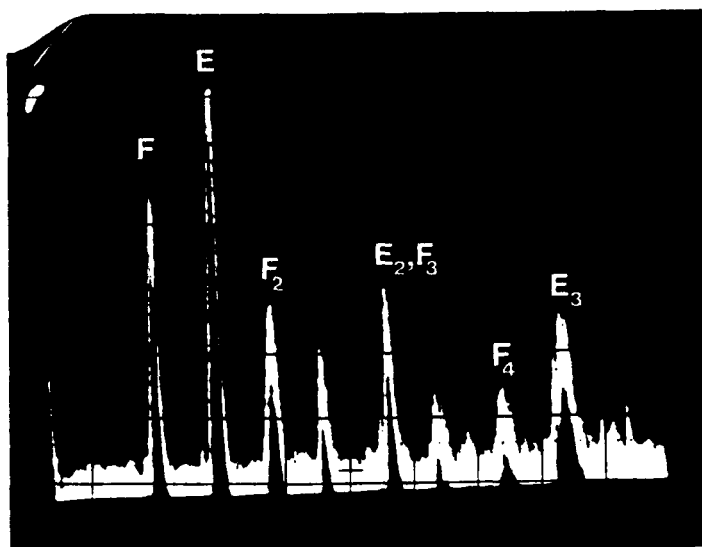


Abb. 20

Empfangssignal einer 1/2"-Litze mit zwei durchtrennten Außendrähten,
Zeitachse: 0,2 ms/Skt

Die Echos vom Ende der Litze (E , E_2 , E_3) sind etwas abgeschwächt, die Echos der "Bruchstelle" (F , F_2 , F_4) erreichen fast die gleiche

Höhe, so daß diese eindeutig nachzuweisen ist. Das Fehlerecho F_3 fällt zufällig genau mit E_2 zusammen und schwächt dieses, offenbar infolge ungünstiger Phasenverschiebung, etwas ab. Bei vier durchtrennten Außendrähten kehren sich die Amplitudenverhältnisse von Fehler- und Endecho um. Unterbricht man alle sechs Außendrähte, so verschwindet das Echo vom Stabende völlig; der Kerndraht leistet offensichtlich zur Schallausbreitung keinen Beitrag, da er durch die Außendrähte vom Magnetfeld des Sendeimpulses abgeschirmt wird.

Es kann als sicher gelten, daß auch der Bruch eines einzelnen Außendrahtes ein auswertbares Fehlerecho ergibt. Auf einen meßtechnischen Nachweis wurde verzichtet, da es sich als schwierig erwies, einen Einzeldraht ohne eine Beschädigung der Nachbardrähte zu durchtrennen, die unkontrollierbare Meßwertverfälschungen zur Folge gehabt hätte.

6.2. Verpreßte Spannstähle

Theoretische Berechnungen lassen, wie in 3.2.2. ausgeführt, in mit Beton oder Verpreßmörtel umgebenen Spannstählen eine starke Dämpfung von US-Signalen erwarten. Um den Grad der Bedämpfung zu ermitteln und zu untersuchen, inwieweit sie als Maß für die Verpreßlänge herangezogen werden kann, wurden Spannstähle von 7,0 mm und 12,2 mm \emptyset mittig in einseitig verschlossene PVC-Rohre von 100 mm \emptyset eingesetzt und diese in 100 mm-Schnitten mit Verpreßmörtel gefüllt. Nach mindestens 24-stündigem Abbinden des Mörtels, der unter Beigabe des Zusatzmittels "Tricosal" angemischt worden war, wurden die Stähle, deren Enden zur Aufnahme der Wandlerspulen "unverpreßt" blieben, durchschallt.

Bei dem 7 mm-Stahl war die Bedämpfung schon bei einer Verpreßlänge von 100 mm so stark, daß sich kein Empfangssignal mehr feststellen ließ. Messungen mit noch geringeren Verpreßlängen hätten in Anbetracht der im Bauwesen üblichen Maße keinerlei praktischen Wert und wurden deshalb nicht als sinnvoll erachtet.

An einem 12,2 mm-Stahl, der im 24-Stunden-Rhythmus 100 mm-weise vergossen und durchschallt wurde, ließen sich bis zu einer Verpreßlänge von 400 mm auswertbare Echosignale empfangen, wobei die Dämpfung ca. 80 dB/m betrug. Danach stieg sie jedoch rapide an, so daß keine weiteren Messungen möglich waren. Setzt man sinnvollerweise einen linearen Zusammenhang zwischen Dämpfung und Verpreßlänge voraus, so muß man vermuten, daß zeitliche Änderungen der akustischen Eigenschaften des Mörtels, bedingt durch chemisch-physikalische Prozesse beim Abbinden, hier eine Rolle spielen.

Um das zeitabhängige Dämpfungsverhalten des Mörtels zu untersuchen, wurde ein 12,2 mm-Stahl auf 300 mm Länge vergossen und in regelmäßigen Zeitabständen durchschallt. Während sich in den ersten drei Tagen keine nennenswerten Veränderungen ergaben, setzte danach eine Amplitudenabnahme von ca. 3 dB/Tag ein. Nach 16 Tagen wurde die Nachweisgrenze der Meßapparatur unterschritten, ohne daß ein Abflachen der zeitproportionalen Dämpfungszunahme festgestellt werden konnte. Diese Beobachtung stimmt überein mit der Erfahrung, daß sich die mechanischen Eigenschaften hydraulischer Bindemittel, wie z.B. die Druckfestigkeit oder die für das akustische Verhalten sehr wichtige Poisson-Konstante, auch mehrere Wochen nach Beginn des Abbindeprozesses noch meßbar verändern [16].

Eine Bestimmung der Verpreßlänge über bautechnisch sinnvolle Entfernungen mit Hilfe von US-Dämpfungsmessungen erscheint unter Berücksichtigung der hier beschriebenen experimentellen Ergebnisse nicht möglich. Zwar wurden nur Messungen mit Impulsen einer einzigen Wellenart, -länge und Amplitude durchgeführt, so daß die Resultate nicht unbedingt verallgemeinert werden können; die Probleme sind jedoch, wie in 3.2.2. ausgeführt wurde, weniger experimenteller als vielmehr prinzipieller Natur, da die physikalisch-akustischen Eigenschaften des Systems Spannstahl - Beton eine im wesentlichen auf den Stahl beschränkte, wenig bedämpfte Schallausbreitung nicht zulassen. Diese Tatsache ist von der Art der US-Erzeugung völlig unabhängig und somit nicht auf das magnetostriktive Verfahren beschränkt.

7. Ausblick

Für die Weiterentwicklung und Anwendung des magnetostruktiven US-Verfahrens in der Baustoffprüfung bieten sich zwei unterschiedliche Richtungen an, die sich aus den beiden Anwendungsmöglichkeiten der Spannbetontechnik, nämlich dem Vorspannen mit bzw. ohne Verbund ergeben.

7.1. Spannglieder mit Verbund

Trotz der in 3.2.2. beschriebenen prinzipiellen Probleme, die bislang meßtechnisch nur bestätigt werden konnten, erscheinen weitere Untersuchungen mit dem Ziel, mit Mörtel verpreßte Spannglieder zu durchschallen, durchaus sinnvoll. So lassen theoretische Berechnungen vermuten, daß im Bereich sehr großer Wellenlängen die "Absorption" der im Stahl erzeugten Schallenergie durch den umgebenden Beton geringer wird [10]. Große Wellenlängen, d.h. niedrige Frequenzen, werden üblicherweise bei der US-Prüfung von Metallen nicht verwendet, da sie ein geringeres Fehlerauflösungsvermögen bewirken und keine gerichtete Schallstrahlung ermöglichen. Beides ist bei der Prüfung von Spannstählen von untergeordneter Bedeutung, so daß der Verzicht auf hohe Prüffrequenzen keine unzumutbare Einschränkung darstellen würde.

Lohnenswert erscheint auch die theoretische und experimentelle Überprüfung der Einsatzmöglichkeiten von Torsions- und Schraubenwellen, deren Verwendung durch die stabförmige Geometrie der Spannstähle nahegelegt wird. Messungen oder Berechnungen ihrer Ausbreitung in einem System ähnlich dem hier behandelten sind allerdings aus der Literatur nicht bekannt.

7.2. Spannglieder ohne Verbund

Spannglieder ohne Verbund sind dadurch gekennzeichnet, daß eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Spannstahl und Beton durch eine nachgiebige Zwischenschicht aus Bitumen oder Schmierfett verhindert wird. Zwar liegen keine Meßwerte für die Dämpfung von Schallwellen in einem System Stahlstab - Bitumen/Schmierfett vor, doch ist zu erwarten, daß diese wesentlich kleiner ausfallen als im untersuchten System Stahlstab - Mörtel. Messungen

der Dämpfung von Dehnwellen in einem in Glyzerin getauchten Stahlstab von 5 mm \varnothing ergaben bei hohen Frequenzen Werte von ca. 30 dB/m, die unterhalb von 300 kHz stark abnahmen [17]. Auch wenn man Unterschiede im akustischen Verhalten von Glyzerin und Schmierfett berücksichtigt, ist der Abstand zu dem im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelten Wert von 80 dB/m für Mörtel sehr deutlich, zumal letzterer mit der Zeit noch beträchtlich ansteigt.

In der Spannbetontechnik ohne Verbund werden häufig Spannlitzen anstelle von massiven Stählen eingesetzt. Gerade bei der Prüfung von Litzen auf Brüche von Einzeldrähten erweist sich, wie in 6.1.3. ausgeführt, die berührungslose magnetostriktive US-Erzeugung als sehr vorteilhaft, so daß sich hier ein zukunfts-trächtiges Anwendungsgebiet ergeben könnte. Das in 4.1. beschriebene US-Gerät vom Typ Ferrotron, mit dem die hier vorgelegten Meßergebnisse gewonnen wurden, ist von seiner Grundkonzeption her für solche Litzenprüfungen einsetzbar; doch aus den Erfahrungen heraus, die mit dem Gerät im Zuge der orientierenden Versuche gemacht wurden, lassen sich einige Möglichkeiten für sinnvolle Modifikationen und Weiterentwicklungen aufzeigen.

- a) Senderseitige Verbesserungsmöglichkeiten: Die Optimierung der Spulen könnte weitergetrieben werden, insbesondere in Richtung definierter Anregung bestimmter Wellenlängen und -moden. Denkbar wäre eine Aufteilung in eine Reihe kurzer Einzelspulen mit einem gegenseitigen Abstand von $\lambda/2$ und alternierender Stromrichtung, wie sie bereits zur US-Prüfung von Rohren eingesetzt wurden [18]. Hierbei wäre zur Abstimmung ein in weiten Bereichen frequenzvariabler Sender erforderlich, der unabhängig von der Spuleninduktivität schwingen und auch sehr niedrige Frequenzen liefern sollte.

Ein nächster Schritt könnte die Nutzung der phased-array-Technik sein, wobei ebenfalls getrennte Spulen mit definierter Phasenverschiebung angesteuert werden, so daß sich eine nahezu einseitige Schallabstrahlung ergibt. Damit ließen sich unerwünschte Störeffekte vermeiden, ohne daß die Wandler-spulen ganz am Stabende angebracht werden müssen.

Dem Sendeimpuls könnte durch CS-Technik (controlled signals) gezielt eine bestimmte Form mit definierter spektraler Verteilung, Bandbreite und Mittenfrequenz gegeben werden, wodurch im Empfangsgerät schmalbandiger, d.h. mit höherem Störabstand gearbeitet werden könnte.

Schließlich wäre es wünschenswert, die Gleichfeldmagnetisierung synchron zum Sendeimpuls ein- und auszuschalten, wodurch höhere Feldstärken bei geringerer Verlustleistung und damit geringerer Erwärmung zu realisieren wären.

- b) Empfangsseitige Verbesserungsmöglichkeiten: Die empfangsseitige Geräteauslegung wäre selbstverständlich den sendeseitigen Veränderungen anzupassen, d.h., die Spulen sind entsprechend zu optimieren und die Einstellung von Frequenz und Bandbreite müßte synchron zum Sender vorgenommen werden. Bei verringerter Bandbreite wäre eine höhere Verstärkung möglich.

Eine Spektralanalyse des Empfangssignals könnte vor allem bei Dämpfungsmessungen neue Erkenntnisse liefern. Ein Speicheroszilloskop mit Schreiberausgang würde die Dokumentation und Weiterverarbeitung der Signale, evtl. per EDV, wesentlich vereinfachen.

- c) Verbesserungsmöglichkeiten der Handhabung: Die Wandler­spulen sollten der Länge nach in zwei Hälften teilbar sein, um sie problemlos an jeder beliebigen Stelle des Stabes anlegen zu können. Gerade in Verbindung mit der erwähnten axialen Unterteilung bietet sich dieses an, obwohl eine aufwendige Wickel­technik erforderlich ist.

8. Zusammenfassung

Trotz weit verbreiteter Anwendung der Spannbetontechnik in den verschiedensten Bereichen des Bauwesens fehlen bis heute wirtschaftliche und zugleich zuverlässige Prüfverfahren zur Untersuchung fertiggestellter Spannbetonbauwerke auf Spanngliedbrüche

und Verpreßzustand. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz versucht zu klären, inwieweit die magnetostriktive US-Prüfung der Spannglieder auf diesem Gebiet Fortschritte erbringen könnte.

Hierzu wurde ein ursprünglich für die Fertigungsüberwachung von Stahldrähten entwickeltes US-Gerät vom Typ "Ferotron" eingesetzt, wobei die Wandlerspulen für die magnetostriktive US-Anregung im Spannstahl den jeweiligen Erfordernissen des Materials im Rahmen der Forschungsarbeit entsprechend dimensioniert und angefertigt wurden. Die Durchschallung wurde in Impuls-Echo-Technik von einem Ende des Stahlstabes her durchgeführt.

Es wurden handelsübliche Spannstähle von 4,1 mm bis 12,2 mm Durchmesser sowie 7-drähtige Spannstahllitzen von 12,5 mm Durchmesser untersucht. Alle Materialien erwiesen sich von ihren magnetischen Eigenschaften her als für die magnetostriktive US-Erzeugung geeignet; die erreichbaren Signalpegel lagen ca. 12 dB unterhalb der an Nickel als Referenzmaterial erzielten Werte und waren damit noch hoch genug für eine zuverlässige Auswertung.

Gemessen wurden die Schallgeschwindigkeit, Wellenlänge und Dämpfung der US-Signale in freiliegenden Stahlabschnitten sowie die Dämpfung in mit Verpreßmörtel ummantelten Stählen. Die an den freiliegenden Stählen ermittelten Ergebnisse stimmten größenordnungsmäßig mit den sich aus theoretischen Berechnungen ergebenden Werten überein; Dispersionerscheinungen der Schallgeschwindigkeit konnten bestätigt werden. Besonders bei der Durchschallung von Litzen, die mit mechanisch anzukoppelnden Prüfköpfen sehr problematisch ist, zeigten sich die Vorteile der magnetostriktiven Methode in einer guten Nachweisbarkeit von Einzeldrahtbrüchen. Bei glatten Spannstählen zeigte sich erwartungsgemäß der Vorzug der absolut reproduzierbaren Ankopplung.

Messungen an den mit Mörtel umgebenen Stählen ergaben Dämpfungswerte von ca. 80 dB/m, zu denen sich noch eine zeitabhängige Zunahme der Dämpfung von etwa 3 dB/Tag addierte. Damit war die

Bedämpfung der US-Signale schon bei Verpreßlängen im Dezimeterbereich so stark, daß mit den verwendeten Geräten keine Durchschallung mehr möglich war. Weitere Untersuchungen in dieser Richtung erscheinen trotz grundsätzlicher physikalisch-akustischer Probleme nicht aussichtslos.

Eine sinnvolle Anwendungsmöglichkeit des beschriebenen und erprobten Verfahrens auf dem gegenwärtigen Entwicklungsstand bietet sich bei der zerstörungsfreien Prüfung von Spanngliedern ohne Verbund, wo wesentlich geringere Dämpfungswerte zu erwarten sind. Besonders bei der Prüfung von Litzen sind wesentliche Vorteile gegenüber herkömmlichen US-Prüfverfahren zu erwarten, die durch gerätetechnische Optimierung noch ausgebaut werden können.

9. Literatur

- [1] Leonhardt, F.: Spannbeton für die Praxis
Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn,
Berlin, 1962
- [2] Landwehrs, K.,
Neisecke, J.: Ultraschall-Untersuchungen an der
Wohnanlage Wohlers-Eichen in Bremen
zur Ermittlung des Verpreßzustandes
von Dywidag-Spanngliedern
Untersuchungsbericht Nr. 82 489
vom 5.04.82 der MPA Braunschweig
- [3] Krautkrämer, J.u.H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall
4. Auflage, Springer-Verlag,
Berlin, 1980
- [4] Kaule, W.: Magnetostriktives Werkstoffprüf-
verfahren
Die Technik, 16. Jg., Heft 5, Mai 1961
- [5] Pochhammer, L.: Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit
kleiner Schwingungen in einem unbe-
grenzten isotropen Kreiscylinder
J. reine angew. Math. (Crelle) 81
(1876) S. 324
- [6] Matauschek, J.: Einführung in die Ultraschalltechnik,
2. Auflage
VEB Technik Verlag, Berlin, 1962
- [7] Thurston, R.N.: Elastic waves in rods and clad rods
J. Acoust. Soc. Am. 64 (1978)
S. 1...37
- [8] Oliver, J.: Elastic Wave Dispersion in a
Cylindrical Rod by a Wide-Band
Short Duration Pulse Technique
J. Acoust. Soc. Am. 29 (1957)
S. 189...194
- [9] Bergmann, K.: Der Ultraschall
6. Auflage, Hirzel, 1954, Stuttgart
- [10] McNiven, H.D.,
Sackman, J.L.,
Shah, A.H.: Dispersion of Axially Symmetric
Waves in Composite, Elastic Rods
J. Acoust. Soc. Am. 35 (1963)
S. 1602...09
- [11] Kikuchi, Y.: Magnetostrictive Metals and
Piezomagnetic Ceramics as Transducer
Materials, S. 1...55
Ultrasonic Transducer Materials, Ed.
by O.E. Mattiat, Plenum Pr.,
New York, 1971

- [12] Kaule, W.: Magnetostrictive Ultrasonic Testing of Materials
Proceed. 4. Internat. Conf. Nondestr. Test., 1963, S. 291...294
- [13] Bergmann-Schaeffer: Lehrbuch der Experimentalphysik
Bd. II, 6. Auflage
De Gruyter, Berlin, 1971
- [14] Knöpfel, H.: Pulsed High Magnetic Fields
North Holland Publ. Comp.,
Amsterdam, 1970
- [15] Zemanek, J.: An Experimental and Theoretical Investigation of Elastic Wave Propagation in a Cylinder
J. Acoust. Soc. Am. 51 (1972),
S. 265...283
- [16] Pohl, E.: Zerstörungsfreie Prüfmethode für Beton
VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1966
- [17] Pester, W.: Ausbreitung von Dehnwellen in Metallstäben: Anwendung zur Füllstandsmessung
Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 9, Nr. 44, 1981
- [18] Mohr, W.,
Licht, H.,
Höller, P.: Zur Prüfung dünnwandiger Rohre mit geführten Ultraschallwellen
Materialprüfung 17 (1975) Nr. 7,
S. 240...241